交流电对X80 钢在近中性环境中腐蚀行为的影响

万红霞[1] 宋东东[1,3] 刘智勇[1] 杜翠薇[1] 李晓刚[1,2]

1 北京科技大学新材料技术研究院 北京 100083

2 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波 315201

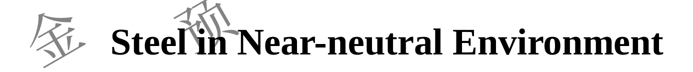
3 航天材料及工艺研究所 北京 100076

摘 要 通过数据采集、电化学测试、浸泡实验和表面分析技术研究了交流电对 X80 钢在近中性环境中的腐蚀行为的影响。结果表明：交流电干扰下，随着交流电密度的增大，交流腐蚀形态发生变化，由全面腐蚀转变为局部腐蚀，且试样表面产生较多的点蚀坑。全波交流电正负半波交替干扰下，X80 钢发生阴阳极极化，导致铁的局部溶解和氢的析出；负半波交流干扰下会导致析氢而发生氢致阳极溶解，产生的点蚀坑均较尖锐；正半波干扰下，只发生阳极溶解，产生的点蚀坑呈现凹形，且比较平滑。不同波形交流干扰下，X80 钢表面产生的腐蚀产物不一致。全波和正半波干扰下，腐蚀产物较疏松而且腐蚀产物发生龟裂，腐蚀产物不存在 α-FeOOH；负半波交流干扰下，X80 钢表面腐蚀产物较致密，腐蚀产物存在 α-FeOOH 对基体具有一定的保护作用。

关键词 交流电 近中性环境 腐蚀行为

中图分类号 TG174 **文章编号** 0412-1961(2017)00-0000-00

Effect of Alternating Current on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Near-neutral Environment



WAN Hongxia[1], SONG Dongdong[1,3], LIU Zhiyong[1], DU Cuiwei[1], LI Xiaogang[1,2]

1 Institute for advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201

3Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing, 100076

Correspondent: DU Cuiwei, professor, Tel: (010)62333931-514, E-mail: dcw@ustb.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51371036, 51131001 and 51471034).

Manuscript received 2016-11-10, in revised form 2016-12-24

ABSTRACT The rapid development of energy, electricity, and transportation industries has created a market for steel pipes; however, buried steel pipelines near high-voltage transmission lines and electrified railways often experience alternating current (AC) corrosion at the lesions coating the pipelines; such phenomenon is mostly due to the resistance between the capacitance and inductance coupling, especially for long-distance pipelines in parallel operation. AC corrosion can cause pipeline corrosion perforation and stress corrosion cracking (SCC) in some cases, which has been a vital threat to the pipeline safety. So, it is important to study the AC corrosion. In this work, the influence of alternating current (AC) on corrosion behavior of X80 pipeline steel was

资助项目 国家自然科学基金项目 51471036、51131001 和 51471034

收稿日期 2016-11-10 **定稿日期** 2016-12-24

作者简介 万红霞，女，1988 年生，博士

通讯作者 杜翠薇，dcw@ustb.edu.cn，主要从事金属材料腐蚀与防护研究

DOI 10.11900/0412.1961.2016.00500

investigated in NS4 near-neutral solution by data acquisition technique, electrochemical test, immersion tests and surface analysis techniques. Results show that with the increasing of AC density, corrosion morphology changed from uniform corrosion to localized corrosion with many pits. Under the full AC interference, X80 steel occurred cathodic and anodic polarization which result in iron dissolution and hydrogen precipitation. The negative half wave AC would lead to hydrogen evolution and hydrogen induced anodic dissolution, the pits in X80 steel surface present sharp. However, under disturbance of positive half-wave AC, only anodic dissolution occurred and the pitting appeared spill shape and smoothly. Under various AC waveform interference, the corrosion products of X80 steel was different. The corrosion products are loose and corrosion products occur crack under full AC wave and positive half-wave interference, corrosion products didn't contain α-FeOOH; However, corrosion products in X80 steel surface were denser under negative half-wave AC interference and corrosion products contains α-FeOOH which has some protective effect on substrates.

KEY WORDS alternating current, near-neutral environment, corrosion behavior

随着能源、电力及铁路系统的迅速发展，由于空间的限制，管线钢与高压输电线或铁路系统平行或交叉铺设的情况越来越多。管线钢、电力及铁路系统几乎都集中在同一区域，此时，高压输电线及铁路系统产生的交流电易对管线钢产生交流腐蚀[1-3]。交流电可能会击穿管道的绝缘层，破坏阴极保护系统，加速管道的腐蚀与破坏，威胁人身安全[4-7]。

交流电对埋地管道的腐蚀问题日益突出，国内外研究者已对交流腐蚀问题开展了一系列的工作，但由于交流电腐蚀过程影响因素众多，腐蚀过程较为复杂，其机理也较多。目前，对于交流电腐蚀机理有强电场诱导模型[8]和电化学模型[9, 10]，电化学模型主要分为整流模型[11]、非线性模型[12]和震荡模型[13]，然而每种腐蚀机理都存在一定的局限性，均存在交流腐蚀无法解释的现象，这使得对交流干扰对管线钢的腐蚀预测及评价存在一定困难，因而开展交流电的腐蚀机理研究具有重要的意义。Xu 等[14]研究了交流电对 16Mn 管线钢的腐蚀，发现交流电能加速其腐蚀；Lalvan 和 Lin[15, 16]提出了一种能预测交流电对钢腐蚀的数学模型。Fu 等[17]研究表明当交流电密度较低时，会引发钢发生均匀腐蚀；但交流电密度较高时，会引发钢发生局部腐蚀如点蚀。此外，Linhardt 和 Ball[18]研究也发现交流电会引发金属发生局部腐蚀。Goidanich 等[19]研究了不同电流密度下碳钢腐蚀速率的变化规律；姜子涛等[20]研究了交流电流密度和频率对 Q235 钢腐蚀行为的影响；杨燕等[21]研究了交流电对 X70 钢腐蚀行为的影响，并提出交流电的正负半周期内的极化效果不对称诱发了金属腐蚀。

尽管国内外学者对交流电腐蚀展开了一系列研究，但由于交流电腐蚀影响因数众多，腐蚀过程较为复杂，且交流电如何影响管线钢的腐蚀还有待进一步研究，而交流电正负半波周期交替进行，其对腐蚀的影响难以研究，本实验将交流电分波为正负半波进行研究，采用数据采集、电化学测试、浸泡实验以及腐蚀产物分析等方法研究交流电对 X80 钢在近中性环境中的腐蚀行为的影响，为管线钢的安全运行及服役提供参考依据。

1 实验方法

1.1 材料及溶液

实验采用 X80 钢板，其主要化学成分（质量分数，%）为 C 0.070，Si 0.216，Mn 1.80，P 0.0137，S 0.0009，Ni 0.168，Cu 0.221，Mo 0.182，N 0.003，Nb 0.105，Al 0.026，Ti 0.013，Cr 0.266，Fe 余量。

实验采用 NS4 溶液来模拟埋地管线近中性环境，溶液成分为：$CaCl_2$ 0.0137 g/L, KCl 0.122 g/L, $MgSO_4\cdot 7H_2O$ 0.131 g/L, $NaHCO_3$ 0.483 g/L。在实验前往溶液中通入 5% CO_2 + 95% N_2 4 h

调节 pH 值至 6.8 左右。整个实验中通入小流量的混合气以维持溶液 pH 值。

1.2 电化学实验

电化学实验试样尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm，在试样背部焊接导线并将除工作面外的部分用环氧树脂封装。实验前将试样用砂纸依次打磨至 2000#，然后用去离子水和酒精清洗，吹干待用。电化学实验包括电位和恒电位极化下电流密度的测试。实验测试前首先将工作电极在-1.0V 下预极化 3min，用以去除电极表面在空气中形成的氧化膜，然后将试样在溶液中静置 20min，在进行电位和恒电位极化下电流密度的测量，恒电位极化电流密度中的相对电位为开路电位。其测试分 3 个过程。（1）施加交流电前电位和电流密度的采集；（2）施加交流电后电位和电流密度的采集；（3）撤去交流电后电位和电流密度的采集。所有电化学实验在 Reference 3000 电化学工作站上进行。电化学实验采用三电极体系，其中试样为工作电极，饱和甘汞为参比电极，Pt 片为对电极，交流电加在试样和石墨电极之间，通过数据采集器（DAQ）可以采集加在试样和石墨电极的波形，如图 1 所示。其中交流电通过信号发生器产生，正负半波由二极管（D）滤波，图 1 中电容（C）用以防止电化学测试系统对交流电源产生干扰，电感（L）防止交流电对电化学测试系统产生干扰。电化学测试时分别通入电流密度为 5、10、20、30、50 和 80 A/m^2 的正弦交流信号。

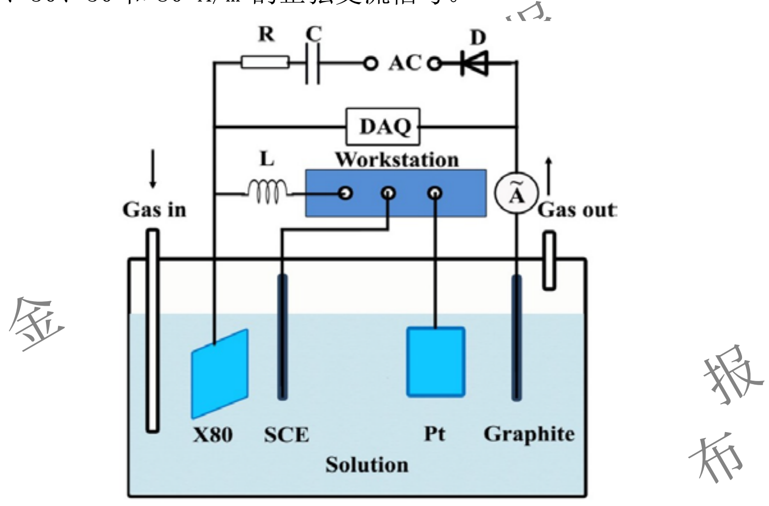


图 1 交流电干扰下 X80 钢电化学装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup for AC corrosion of X80 steel in NS4 solution（*R*-resistance, *C*-capacitance, AC-signal generator, DAQ-data acquisition unit, L-impedance, WE-working electrode, RE-reference electrode, CE-counter electrode, SCE-saturated calomel electrode）



1.3 浸泡实验

浸泡实验的试样尺寸同样为 10 mm×10 mm×3 mm，试样背部焊接导线并固封于环氧树脂中，接着将试样表面用水砂纸依次打磨至 2000#，抛光至表面光亮无划痕，并用丙酮擦洗除油和脱水，吹干备用；每种实验条件采用 4 组平行试样，按照图 2 将浸泡试样和石墨电极安装，交流干扰信号发生器的正极接试样，负极接石墨电极，分别通入交流电流密度为 0、5、10、30、50 和 100 mA/m^2 的正弦信号，浸泡实验周期 48 h。为避免施加交流电后温度对实验的影响，采用恒温水浴锅控制实验温度为 25 ℃。实验结束后，将 3 个平行试样在超声波中用 500 g 浓盐酸（HCl）+500ml 去离子水（H_2O）+（3-10）g 六次甲基四胺（$C_6H_{12}N_4$）配成的除锈液清洗 30 （时间）去除表面腐蚀产物。用 Quanta 250 环境扫描电镜（SEM）观察微观腐蚀形貌，工作电压 20 kV。用(型号)X 射线衍射（XRD）方法和(型号)Raman 光谱分析腐蚀产物的相组成。

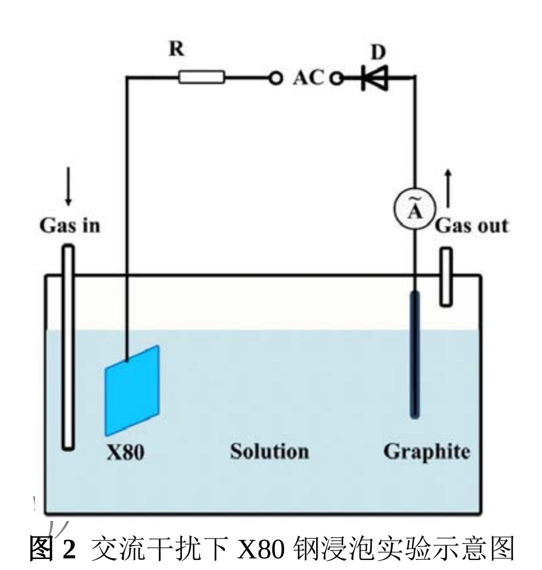


图 2 交流干扰下 X80 钢浸泡实验示意图

Fig.2 Schematic of the AC immersion test of X80 steel in NS4 solution

2 实验结果

2.1 电化学分析

图 3 为 X80 钢在全波、负半波和正半波不同交流电密度下采集的波形。通过二极管正接和反接可以将全波交流电分成负半波交流电和正半波交流电。此外，从图中可以发现交流电电压随交流电密度增大而增大，交流电频率均为 50 Hz。

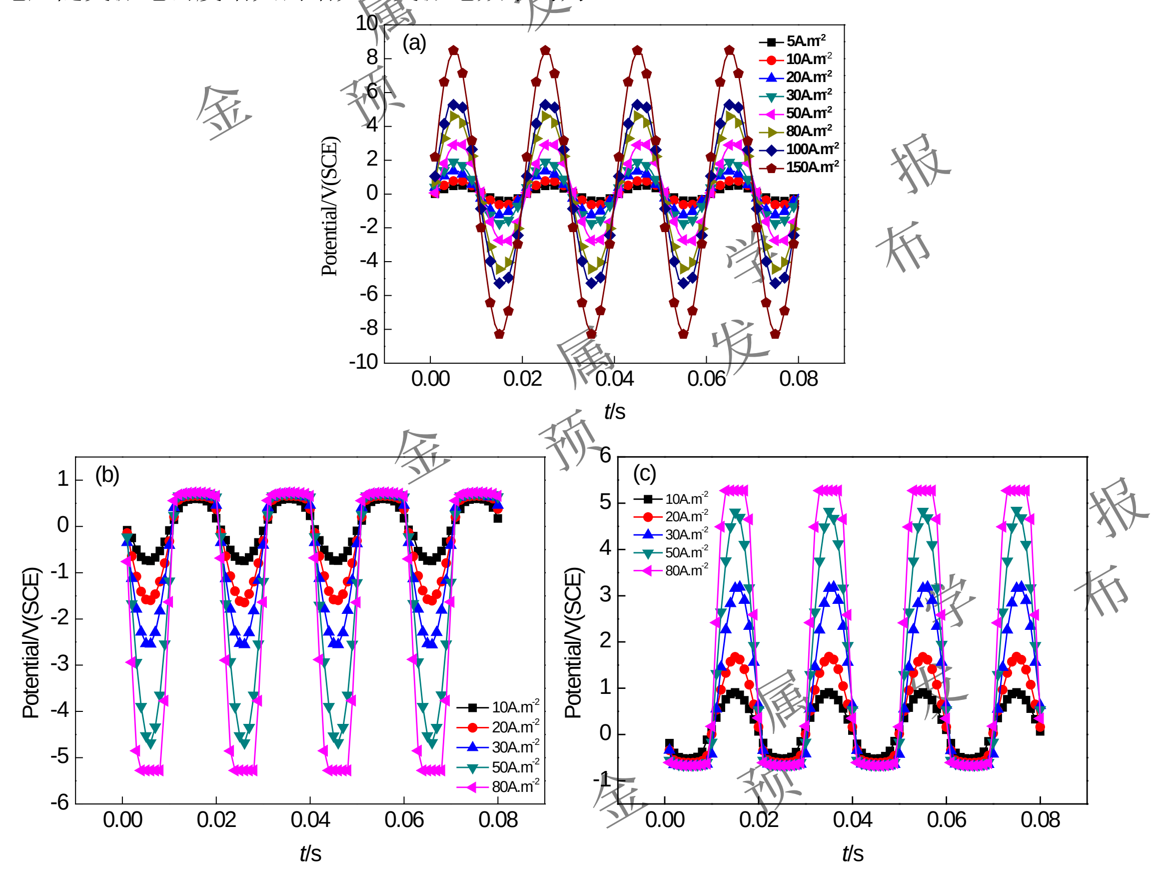


图 3 X80 钢在全波，负半波和正半波作用下数据采集器采集的波形

Fig.3 AC potential signals acquisition on X80 steel under various AC wave with different densities full wave (a), negative half wave (b) and positive half wave (c)

图 4 是 X80 钢在全波、负半波和正半波作用下电化学工作站测定的 X80 钢和饱和甘汞电极之间的直流电位。其中分为 3 个过程：(1) 施加交流电时电位随时间的变化；(2) 施加不同波形的交流电后电位随时间的变化；(3) 撤去交流电后电位随时间的变化。可以发现,在未施加交流电时，其电位均在-0.74 V 左右。当施加不同波形的交流电后，其电位均发生一定程度的负移，施加交流电密度越大，负移越多，当施加的交流电密度为 50 A/m^{2}时，其电位值低于-0.8 V，说明交流电能促进腐蚀的发生；此外施加交流电后电位会发生一定的波动，说明交流电具有一定的震动作用。撤去交流电后，电位又恢复到-0.74 V 左右，电位与未加交流电之前稍微正或负移，说明撤去交流电之后交流加强腐蚀的现象将持续，进一步说明交流腐蚀的不可逆性。

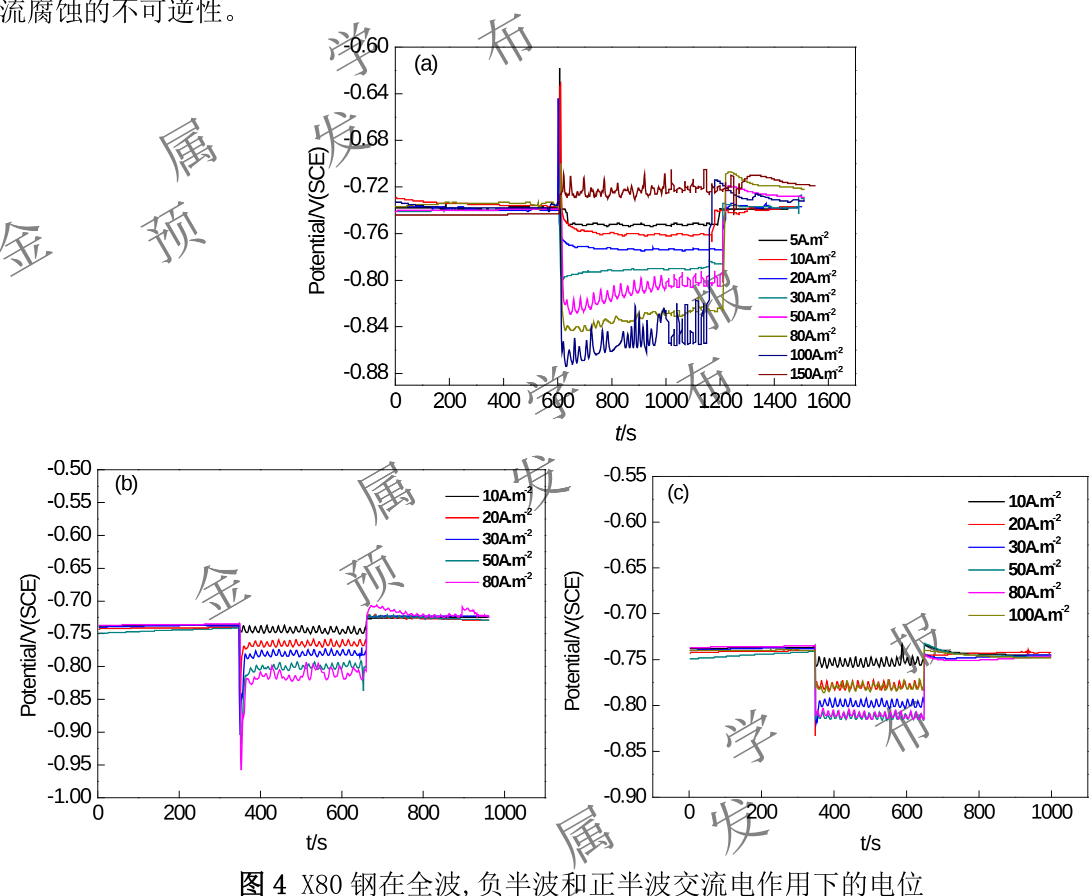


图 4 X80 钢在全波，负半波和正半波交流电作用下的电位

Fig.4 Potential of X80 steel under full wave AC (a), negative half AC (b) and positive half AC (c) interference

图 5 为 X80 钢在全波、负半波和正半波交流电作用下的恒电位(其相对电位为开路电位)极化下的电流密度。电流密度的采集也分为 3 个过程：(1)施加交流电前在开路电位下的电流密度；(2)施加交流电时在开路电位下的电流密度；(3)撤去交流电后在开路电位下的电流密度。未施加交流电前其电流密度均在 0 mA/cm^2 附近，说明腐蚀速率较低；施加不同波形的交流电后，其电流密度迅速升高，说明交流电能明显促进腐蚀，撤去交流电后可以发现其电流密度又降低，说明只有在施加交流电时，其腐蚀将会明显的得到促进。

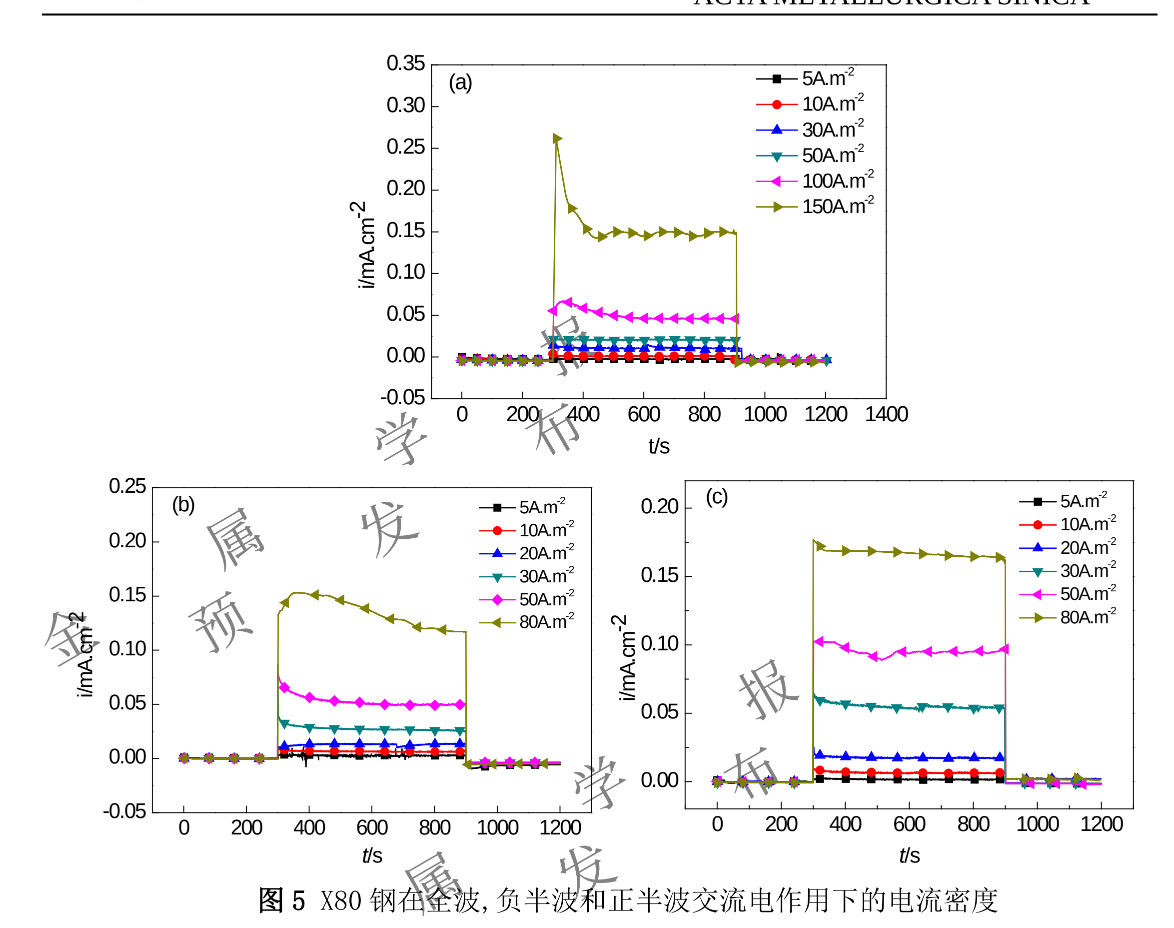


图 5 X80 钢在全波, 负半波和正半波交流电作用下的电流密度

Fig.5 Current density of X80 steel under full wave AC (a), negative half AC (b) and positive half AC (c) interference

2. 2 腐蚀形貌

图 6 为 X80 钢在全波、负半波和正半波交流电电流密度分别为 0、5、10、30、50 和 100 A/m^2 浸泡 48 h 后的腐蚀形貌，均取自于试样中心位置附近。当施加的交流电密度比较小时，X80 钢浸泡 48 h 后其腐蚀均较轻微。当交流电密度大于 30 A/m^2 时，无论是全波交流电作用下还是半波交流电作用下，试样表面均产生点蚀坑。不同的是全波交流电作用下浸泡 48 h 后，其点蚀坑比较尖锐，说明此交流电作用下，点蚀坑产生于阳极溶解和氢致阳极溶解的作用[22]。当施加的交流电为负半波交流电时，试样表面产生较多点蚀孔，这可能是由于施加交流电负半波时，能促进氢的析出，氢原子在空洞、夹杂物等处存留，随着施加交流电时间的延长，氢原子在空洞和夹杂物等处富集越来越多，从而发生氢致阳极溶解而产生点蚀[22, 23]。在正半波作用下浸泡 48 h 后，试样表面点蚀坑比较平滑，此处点蚀坑的产生是由于施加正半波交流电时等于施加阳极电位而使金属产生阳极溶解。



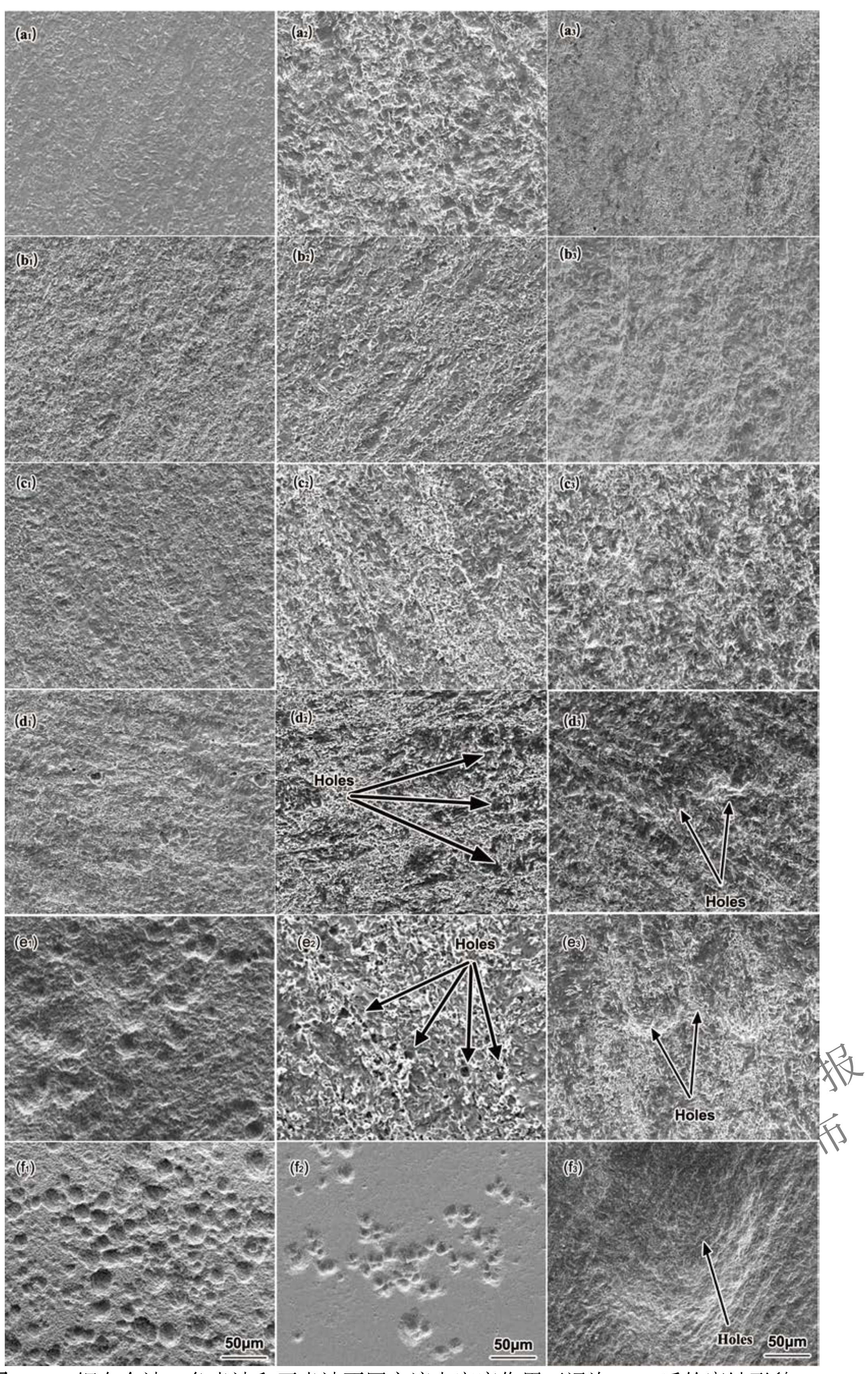


图 6 X80 钢在全波、负半波和正半波不同交流电密度作用下浸泡 48 h 后的腐蚀形貌

Fig.6 Immersion corrosion morphologies of X80 steel under the interference of full wave AC (a1~f1), negative half wave AC (a2~f2) and positive half wave AC (a3~f3) with current density 0 (a_1~a_3), 5 (b_1,b_2,b_3), 10 (c_1~c_3), 30 (d_1,d_2,d_3), 50 (e_1~e_3) and 80 (f_1~f_3) A·m^{-2}, respectively

2.3 腐蚀产物分析

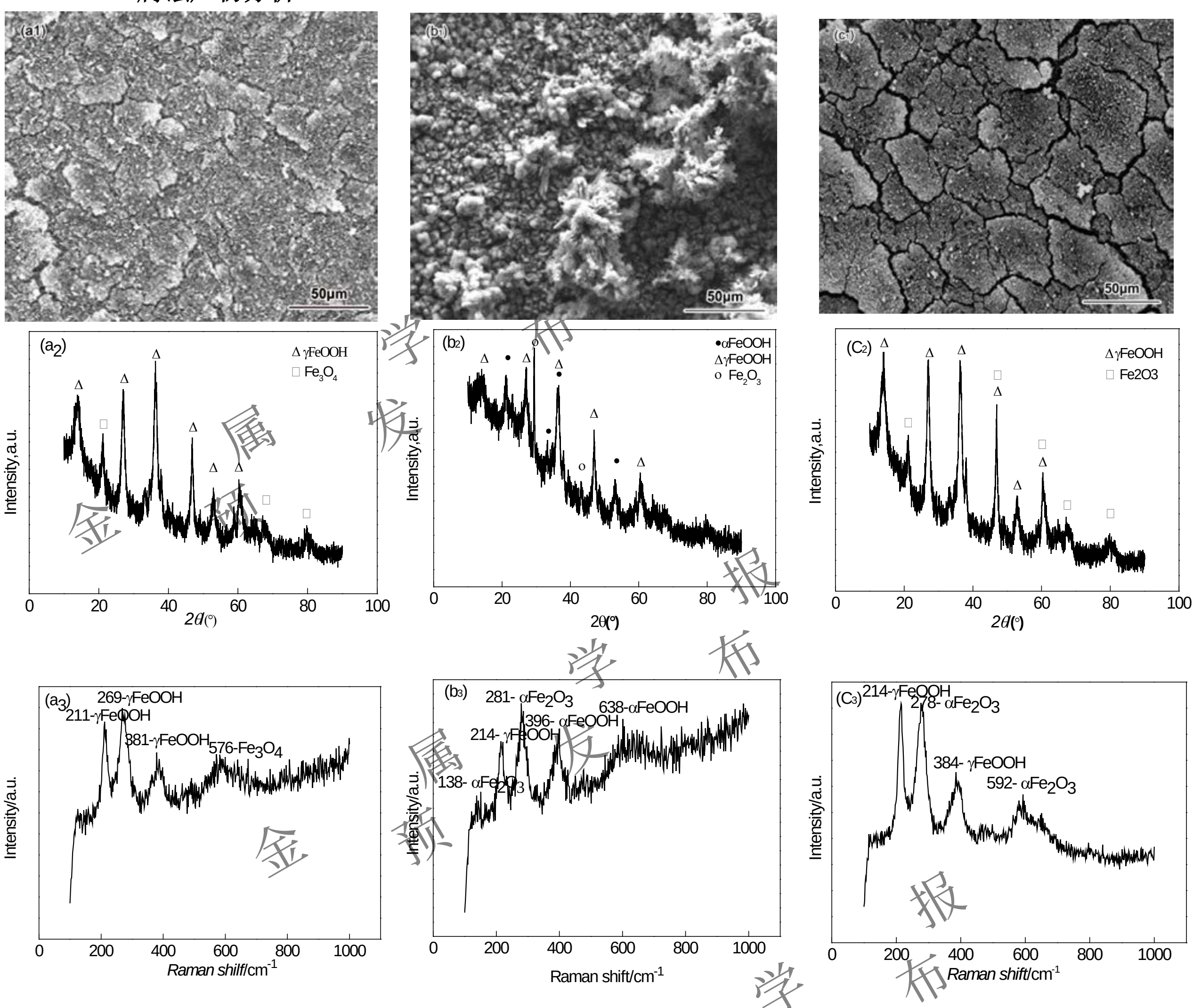


图 7 X80 钢在全波, 负半波和正半波交流电作用下带锈形貌和腐蚀产物分析

Fig.7 Corrosion morphology (a1~c1), XRD (a_2~c_2) and Raman(a_3~c_3) analysis of rust and corrosion products of X80 steel under the interference of full wave AC(a_1~a_3), negative half-wave AC(b_1~b_3) and positive half-have AC(c_1~c_3)

图 7 是全波交流电作用下，X80 钢在近中性环境中浸泡 84h 后的腐蚀形貌和腐蚀产物分析。从 XRD 和 Raman 谱分析可以看出，X80 钢在近中性环境全波交流电干扰下浸泡 84h 后的腐蚀产物较为疏松，腐蚀产物表面出现龟裂现象，其腐蚀产物主要为 γ-FeOOH 和 Fe_3O_4，对基体保护作用较差；而在负半波交流电干扰下浸泡 84h 后的腐蚀产物主要为 α-FeOOH、γ-FeOOH 和 Fe_2O_3；在正半波交流电干扰下浸泡 84h 后的腐蚀产物主要为 γ-FeOOH 和 Fe_2O_3。不同交流电干扰下，其腐蚀产物不同，这可能由于在全波交流电干扰下金属发生腐蚀主要是由于交流电促进金属的阳极溶解；而在负半波交流电作用下，X80 钢表面生成 α-FeOOH，而 α-FeOOH 腐蚀产物比较致密，对基体具有一定的保护作用；而正半波交流电作用下，其腐蚀产物较为疏松，腐蚀产物表面很多龟裂纹，对基体保护作用差，X80 钢主要表现为阳极溶解机制。

3 分析讨论

研究[24]表明，X80 钢在近中性环境中其电化学阴阳极反应包括钢的阳极溶解以及氧的还

原。当施加一定交流电后，导致腐蚀电位的周期扰动。交流电电位随交流电密度的增大而增大，当施加交流电密度为 30A.m^{-2}，交流电位能达到 2V；当交流电密度为 150A.m^{-2}时，其电位将近 10V（图 3）。施加不同波形的交流电后，其腐蚀电位发生一定的负移，最低电位值低于 0.8V（图 4），说明当交流电处于正半波后阴极将发生析氧反应和处于负半波时发生析氢反应。

交流电正电位：$2H_2O-4e^- \rightarrow O_2+4H^+$　　(1)

交流电负电位：$2H_2O+2e^- \rightarrow H_2+2OH^-$　　(2)

施加交流电后，X80 钢将发生周期的阴阳极极化，在阳极极化的作用下 X80 钢将发生阳极溶解，形成腐蚀产物层沉积于试样表面[25]：

$Fe^{2+}+2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$　　(3)

$6Fe(OH)_2+O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4+6H_2O$　　(4a)

$4Fe(OH)_2+O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3+4H_2O$　　(4b)

$4Fe(OH)_2+O_2 \rightarrow 4FeOOH+2H_2O$　　(4c)

由于交流电的方向是不断变化的，引起 X80 钢发生交替循环的阴阳极极化。在交流电的正半周期作用下，X80 钢发生阳极极化，铁溶解形成 Fe^{2+}，Fe^{3+}与电解液中的 OH^-结合形成 $Fe(OH)_2$覆盖在碳钢的表面。然而 $Fe(OH)_2$的结构是疏松多孔的，很难对碳钢基体形成保护，但 $Fe(OH)_2$很不稳定，迅速与碳钢周围电解液中的溶解氧发生反应生成 Fe_3O_4。在交流电的负半波周期作用下，X80 钢发生阴极极化，阴极极化过程中生成的 Fe_3O_4发生还原反应转变成 $Fe(OH)_2$。周而复始，在全波交流干扰下腐蚀产物为 $Fe(OH)_2$和 Fe_3O_4。负半波交流干扰下，X80 钢溶解形成的 Fe^{2+}与电解液中的 OH^-结合形成的 $Fe(OH)_2$发生氧化形成 Fe_2O_3，当电位足够低时，阴极发生氢的析出；而在正半波交流电干扰下，X80 钢溶解形成的 Fe^{2+}与电解液中的 OH^-结合形成的 $Fe(OH)_2$发生阳极极化形成 Fe_3O_4和 FeOOH，最终在表面形成疏松多孔的腐蚀产物。无论是全波交流电干扰下还是半波交流电干扰下，当交流电密度小于 30 A/m^{2}时，其腐蚀较轻微主要以均匀腐蚀为主，与未加交流电的腐蚀形貌差别较小。当交流电密度大于 30 A/m^2 时，其腐蚀主要以局部腐蚀为主，试样表面产生较多的点蚀坑，但不同的是全波交流干扰下，点蚀坑较尖锐，这可能是由于交流电正负半波交替干扰下，X80 钢交替发生阴阳极极化，而发生铁的局部溶解和氢的析出，从而在局部形成点蚀[21]。而在负半波交流电干扰下，X80 钢发生阴极极化，当电位足够低时，氢析出导致氢致阳极溶解，从而当电流密度为 150 A/m^2 时，X80 钢表面未发生腐蚀却产生点蚀坑，这主要是由于氢致阳极溶解作用导致。在正半波交流电干扰下，X80 钢发生阳极极化，阳极发生钢的溶解，阴极主要发生吸氧反应。阳极溶解使钢表面产生点蚀，点蚀坑呈现凹形，且比较平滑。这主要是由于阳极只发生金属的阳极溶解。

X80 钢与近中性土壤模拟溶液组成的腐蚀体系是一个不完全的极化的电极体系，由于腐蚀产物膜电阻较小，可以忽略其作用，特别是在交流电作用下，因而其相界面区可以等效成一个电阻和一个电容并联[26]。当在试样上施加交流杂散电流时，大部分交流电充当非法拉第电流对双电层进行充放电作用以及 H_2O 的氧化还原反应（如式 1，2），只有少部分的交流电充当法拉第电流参与钢的溶解过程。当施加不同的交流电密度时，其峰值可以达到 10 V(图 3)，但检测的腐蚀电位却只移动了 100 mV 左右(图 4)，说明只有 1.5%到 2%的交流电充当法拉第电流参与电极反应。当交流电电流密度较低时（小于 30 A/m^{2}时），X80 钢表现为均匀腐蚀，主要原因是交流电使金属表面形成小蚀孔和厚膜，从而发生均匀腐蚀。当交流电密度处于较高水平时(大于 30 A/m^2)，形成大孔蚀且集中分布。表面膜较薄，金属表面发生点蚀，严重时导致金属腐蚀穿孔[7]。进入交流电负半周期后，孔蚀内不再发生溶解而扩大，但由于交流电负半波的电位能促进氢的析出，而致使金属表面发生氢致阳极溶解而产生点蚀坑(图 6f2)，但其他区域均为参与腐蚀。当交流电进入阳极半周期时，腐蚀产物膜会被击穿，继而产生密

度和大小不同的蚀孔，金属表面只发生阳极溶解。其次当交流电密度较大时，交流电由于电场的作用，加快各种离子的迁移，缩短了离子碰撞的“自由程”，增加了反应物的动能，加速 X80 钢的腐蚀，腐蚀产物层发生局部破坏，促使点蚀坑的生成，点蚀坑数量也逐渐增多[14]。再次，交流电的震动作用也会加速离子的迁移，从而促进腐蚀。

4　结论

（1） 交流电干扰下，随着交流电密度的增大，交流腐蚀形态发生变化，由全面腐蚀转变为局部腐蚀，且试样表面产生较多的点蚀坑；

（2） 全波交流电正负半波交替干扰下，X80 钢交替发生阴阳极极化，导致铁的局部溶解和氢的析出，负半波交流干扰下会导致析氢而发生氢致阳极溶解，因此产生的点蚀坑均较尖锐；正半波干扰下，只发生阳极溶解，产生的点蚀坑呈现凹形，且比较平滑。

（3）不同波形交流干扰下，X80 钢表面产生的腐蚀产物不一致。全波和正半波干扰下，腐蚀产物较疏松而且腐蚀产物发生龟裂，腐蚀产物不存在 α-FeOOH；负半波交流干扰下，X80 钢表面腐蚀产物较致密，腐蚀产物存在 α-FeOOH 对基体具有一定的保护作用。

参考文献

[1] Tribollet, Meyer M. 2–AC-induced corrosion of underground pipelines [J]. Undergr Pipeline Corros, 2014: 35-61.

[2] Meyer M, GDF-SUEZ F. AC-induced corrosion of underground pipelines [J]. Undergr Pipeline Corros, 2014, 63: 35.

[3] Zhang, Vairavanathan P R, Lalvani S B. Perturbation method analysis of AC-induced corrosion [J]. Corros Sci, 2008, 50(6): 1664-1671.

[4] Wakelin R, Sheldon C. Investigation and Mitigation of AC Corrosion on a 300 MM Natural Gas Pipeline [J]. Clin Microbiol Infec, 2004, 10(11): 972.

[5] Zhu M, Du C W, Li X G, et al. Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate/bicarbonate solution [J]. Electrochim Acta, 2014, 117:351-359.

[6] Tang D Z, Du Y X, Li X X, et al. Effect of alternating current on the performance of magnesium sacrificial anode [J]. Mater Design, 2015, 93:133-145.

[7] Zhu M, Du C W, Li X G, et al. Effect of AC on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution [J]. Corros Sci, 2014, 87:224-232.

[8] Zhu M, Liu Z Y, Du C W, et al. Effects of Alternating Current on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Acid Soil Environment[J]. J Mater Eng, 2015, 43(2): 85-90.
(朱敏，刘智勇，杜翠薇等. 交流电对 X80 钢在酸性土壤环境中腐蚀行为的影响 [J]. 材料工程, 2015, 43(2): 85-90.)

[9] Lalvani S, Zhang G. The corrosion of carbon steel in a chloride environment due to periodic voltage modulation: Part I [J]. Corros Sci, 1995, 37(10): 1567-1582.

[10] Jones D. Effect of alternating current on corrosion of low alloy and carbon steels [J]. Corrosion, 1978, 34(12): 428-433.

[11] Kulman F. Effects of alternating currents in causing corrosion [J]. Corrosion, 1961, 17(3): 34-35.

[12] Bosch R W, Bogaerts W F. A theoretical study of AC-induced corrosion considering diffusion

phenomena [J]. Corros Sci, 1998, 40(2–3): 323-336.

[13] Nielsen L. Role of Alkalization in AC Induced Corrosion of Pipelines and Consequences Hereof in Relation to CP Requirements [J]. Corrosion, 2005,

[14] Xu L Y, Su X, Yin Z X, et al. Development of a real-time AC/DC data acquisition technique for studies of AC corrosion of pipelines [J]. Corros Sci, 2012, 61:215-223.

[15] Lalvani S, Lin X. A theoretical approach for predicting AC-induced corrosion [J]. Corros Sci, 1994, 36(6): 1039-1046.

[16] Lalvani S, Lin X. A revised model for predicting corrosion of materials induced by alternating voltages [J]. Corros Sci, 1996, 38(10): 1709-1719.

[17] Fu A Q, Cheng Y F. Effects of alternating current on corrosion of a coated pipeline steel in a chloride-containing carbonate/bicarbonate solution [J]. Corros Sci, 2010, 52(2): 612-619.

[18] Linhardt P, Ball G. AC corrosion: results from laboratory investigations and from a failure analysis; proceedings of the NACE International CORROSION/2006 Conference Papers on CD-ROM, F, 2006 [C].

[19] Goidanich S, Lazzari L, Ormellese M. AC corrosion. Part 2: Parameters influencing corrosion rate [J]. Corros Sci, 2010, 52(3): 916-922.

[20]Jiang Z T, Du Y X, Dong L, et al. Effect of AC current on corrosion potential of Q235 steel[J]. Acta Metall Sin, 2011, 47(8): 997-1002.

(姜子涛，杜艳霞，董亮等. 交流电对 Q235 钢腐蚀电位的影响规律研究 [J]. 金属学报，2011, 8): 997-1002.)

[21] Yan Y LiZ L, Wen C. Effects of alternating current on X70 steel morphology and electrochemical behavior[J]. Acta Metall Sin, 2013, 49(1): 43-50.

(杨燕，李自力，文闯. 交流电对 X70 钢表面形态及电化学行为的影响 [J]. 金属学报，2013, 49(1): 43-50.)

[22] Wan H X, Du C W, Liu Z Y, et al. The effect of hydrogen on stress corrosion behavior of X65 steel welded joint in simulated deep sea environment [J]. Ocean Eng, 2016, 114:216-223.

[23] Li M C, Cheng Y F. Mechanistic investigation of hydrogen-enhanced anodic dissolution of X-70 pipe steel and its implication on near-neutral pH SCC of pipelines [J]. Electrochim Acta, 2007, 52(28): 8111-8117.

[24] Fu A Q, Cheng Y F. Effect of alternating current on corrosion and effectiveness of cathodic protection of pipelines [J]. Can Metall Quart, 2013, 51(1): 81-90.

[25] Zhang G A, Cheng Y F. On the fundamentals of electrochemical corrosion of X65 steel in CO_2-containing formation water in the presence of acetic acid in petroleum production [J]. Corros Sci, 2009, 51(1): 87-94.

[26] Kuang D,Cheng Y.F. Understand the AC induced pitting corrosion on pipelines in both high pH and neutral pH carbonate/bicarbonate solutions [J]. Corros Sci,2014,85:304-310.